

## **ENSAYO DE UN COLECTOR SOLAR PARA LA AGROINDUSTRIA**

V. Molina<sup>1</sup>, G. Durán<sup>2</sup>, M. Condori.

INENCO, Instituto de Investigación en Energía No Convencional. (UNSa-CONICET)

Universidad Nacional de Salta,

Avda. Bolivia 5150, A4408FVY, Salta, Argentina.

Te: 54-387-4255424, Fax: 54-387-4255489, mail: molinav@inenco.net

**RESUMEN:** En este trabajo se presenta el estudio del comportamiento térmico de un colector solar de aire plano, el cual es parte de un conjunto modular cuya aplicación fue pensada para la agroindustria como el secado solar. El prototipo experimental tiene 3,40 m de largo, 2,10 m de ancho y 0,085 m de espesor, y fue ensayado en condiciones de campo. Se presentan los distintos resultados experimentales obtenidos con circulación de aire forzada. El comportamiento del colector presenta rangos de temperaturas de flujo de aire apropiados para el secado de frutas y hortalizas. La diferencia de temperatura entre el aire a la salida del colector y la ambiente es del orden de 20°C, con velocidad de flujo de 0,40 ms<sup>-1</sup>. Se obtiene en este caso una eficiencia instantánea del orden de 50 %.

**Palabras clave:** Colector solar de aire, calefacción industrial, ahorro energético

### **INTRODUCCION**

En las ultimas décadas el estudio de colectores solares ha recibido un mayor interés a causa del amplio rango de aplicaciones que pueden tener como alternativa de ahorro energético en el sector industrial. El determinar su eficiencia energética es de gran importancia para su aceptación a escala comercial ya que la factibilidad técnica y económica de un colector solar para el uso industrial depende fuertemente de la eficiencia térmica esperada del sistema. Usualmente los colectores solares planos empleados por la agroindustria no operan a temperaturas de salida superiores a los 70 °C, para temperaturas mayores es necesario emplear colectores solares con concentrador.

En escala industrial es necesario conectar un número grande de colectores solares idénticos, cuya conexión entre ellos dependerá del criterio de diseño empleado. En este trabajo se presenta el estudio del comportamiento térmico de un prototipo de colector solar plano, el cual es parte de un conjunto modular cuya aplicación fue pensada para la agroindustria.

Diversos trabajos exponen una variedad de colectores solares de diferentes tipos y formas de circulación de aire, los estudios demuestran que se aprovecha mejor el área de contacto del flujo con la chapa cuando se utiliza la disposición transversal que con una disposición recta de la misma con respecto a la dirección preferencial del flujo [1] y [3]. Esto se debe a que la generación de vórtices en la disposición transversal optimiza la transferencia debido a la recirculación del flujo.

En las secciones que siguen se presenta los ensayos realizados con el colector con circulación de aire producida por un ventilador eléctrico. Para el mismo se presentan las medidas de tres días con distintas velocidades de circulación.

### **ASPECTO CONSTRUCTIVO Y CAMPAÑA DE MEDIDAS**

El prototipo ensayado mide 3,40 m de largo, 2,10 m de ancho y 0,085 m de espesor. Posee una base realizada en chapa galvanizada ondulada pintada de negro con el fin de aumentar su absorción de la radiación solar, el flujo de aire a través del colector es transversal a la chapa ondulada. Se ha elegido este criterio de circulación debido a que la turbulencia producida por ésta disposición favorece a la disipación de energía térmica [1].

Sobre la parte superior del colector se colocó una placa de policarbonato de 4 mm de espesor. Se eligió este grosor porque la relación entre las propiedades ópticas y el costo de la placa es la más favorable. Estudios realizados con otros espesores de policarbonato no muestran variaciones sustanciales de la transmitancia (Perelló et al., 2001). La parte posterior del colector no se aísla térmicamente, lo que representa una disminución en el costo de construcción, ya que el mismo está diseñado para actuar como envolvente de una cámara de secado, sin contacto directo con aire húmedo, reutilizando las pérdidas por el fondo. El colector toma el aire caliente de la zona alta de la cámara y lo introduce al interior de la cámara de secado mediante la ayuda de un ventilador eléctrico.

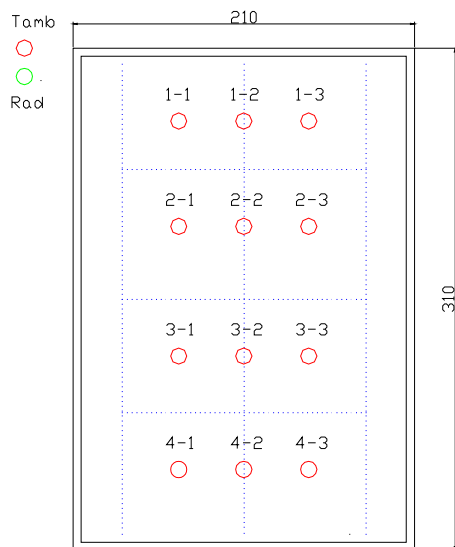
---

<sup>1</sup> Becario PICTOS UNSa - FONCYT

<sup>2</sup> Becario CONICET

Se realizó un estudio del colector prototipo durante el mes de Agosto de 2008, en las instalaciones del INENCO, en la Universidad Nacional de Salta. Las variables censadas incluyen temperatura, radiación global incidente sobre plano horizontal, y velocidad de flujo. Además, fueron realizadas una serie de fotografías térmicas.

Para la medición de temperatura del aire se utilizaron termocuplas tipo K. Las mismas se colocaron sobre el absorbedor en la disposición mostrada en la figura 1 (a), este arreglo sirve para promediar los datos de la temperatura por fila, con un total de termocuplas por columna de 4. Por fila se tienen 3 termocuplas para tomar la temperatura del aire y una para medir la temperatura del absorbedor, esta ultima se ubica en la zona central del colector a lo largo del mismo, pegados a la chapa de zinc. La ubicación de las termocuplas se debe a que las ondulaciones de la chapa del absorbedor son transversales a la dirección preferencial del flujo, lo que causa, como se mencionó anteriormente, que el flujo se comporte de forma turbulenta y el promedio de las temperaturas por sector permite obtener una medida representativa de la temperatura en esa zona, así como también nos permite tener una idea de los sectores donde más pérdida puede tener el colector. La disposición de las filas de acuerdo a la nomenclatura es la siguiente: fila 1 entrada de aire, fila 2 sector medio superior, fila 3 sector medio inferior y fila 4 boca de salida. La figura 1 (b) muestra una fotografía de la parte posterior del colector. En esta imagen se puede apreciar la disposición de las termocuplas en el colector. Cabe aclarar que en el momento en que se realizó la foto todavía no se había colocado el motor.



(a)

(b)

Figura 1 (a) Disposición termocuplas, (b) parte posterior del colector.

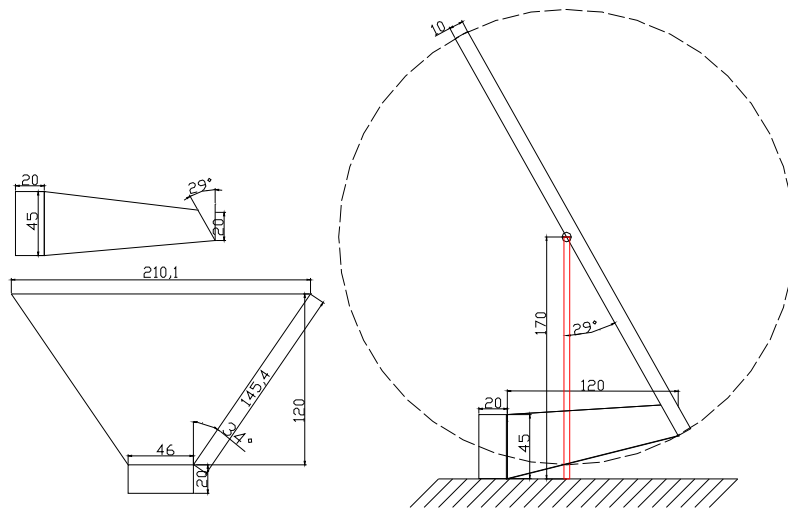


Figura 2: Corte de perfil del colector con soporte manga de conexión con el motor.

La inclinación con la que se ensayó el colector para los tres días fue de  $30^\circ$  con respecto a la horizontal. Con este propósito se construyó un soporte giratorio, sobre el cual esta apoyado el colector. El soporte construido puede girar alcanzando distintos

ángulos, de forma que se podrá estudiar el colector de forma estacional con distintas inclinaciones. En la figura 2 se puede apreciar un corte de perfil del colector, las dimensiones del sistema ensayado, y la manga plástica de conexión entre el colector y el motor. El sentido de giro de este último hace que el colector trabaje en depresión, de forma tal que el aire ingresa por la parte superior del colector hacia la inferior en donde se encuentra el ventilador.

Si bien se cuenta con medidas a lo largo del día, para el estudio del colector se considero solo el rango horario de 11 a 16 horas ya que se cuenta con la mayor radiación solar incidente sobre el colector. Las medidas de temperatura y radiación, fueron comandadas mediante un datalogger Campbell Sci CR 23X con un multiplexor Campbell modelo ATM 25 de 25 canales diferenciales, con un intervalo entre medidas de quince minutos. Para las medidas de temperatura se utilizaron termocuplas tipo K, convenientemente calibradas. Para medir la radiación se utilizó un piranómetro Kipp & Zonnen CM 3. Las mediciones de velocidad se realizaron con un anemómetro de hilo caliente TSI modelo 8345. Por ultimo las fotografías térmicas se tomaron con interferómetro marca Inframetrics, modelo 600LEI2C.

## RESULTADOS OBTENIDOS

Las figuras 3, 4 y 5 muestran la temperatura ambiente y la radiación sobre plano horizontal para los tres días ensayados, 27, 28 y 29 de agosto respectivamente. En las mismas puede observarse que la radiación fue semejante para los tres días mientras que la temperatura para el ultimo día, experimento una fuerte disminución. Esto se debió a una gran perdida convectiva con el medio ambiente ya que el colector estuvo expuesto al viento frío.

Las figuras 6, 7 y 8 muestran las distribuciones de temperatura sobre el absorbedor para los días 27, 28 y 29 de agosto. En las mismas puede apreciarse que en el primer día de ensayo se alcanzaron los mayores valores de temperatura. Al compararse estos resultados con los datos de la figura 5 vemos que la temperatura ambiente alcanzada para el primer y segundo día de ensayo son mayores que la temperatura ambiente del tercer día, mientras que la radiación solar incidente sobre plano horizontal en los tres días del ensayo es de orden similar. Este comportamiento puede estar originado por el viento norte presente en los días 27 y 28 de Agosto. Para un próximo ensayo con el colector esta pensado medir la velocidad y dirección del viento. En estas figuras se observa que la dispersión de temperaturas es de 10 °C aproximadamente, sin presencia de isotermas horizontales, lo que se debe a las pérdidas laterales de calor. La temperatura del nodo 3 siempre está por encima de la 4, a la salida. Cabe recordar que la chapa absorbidora no está aislada por el fondo por lo que el comportamiento observado está fuertemente afectado por las pérdidas térmicas por radiación y convección con el viento circulante.

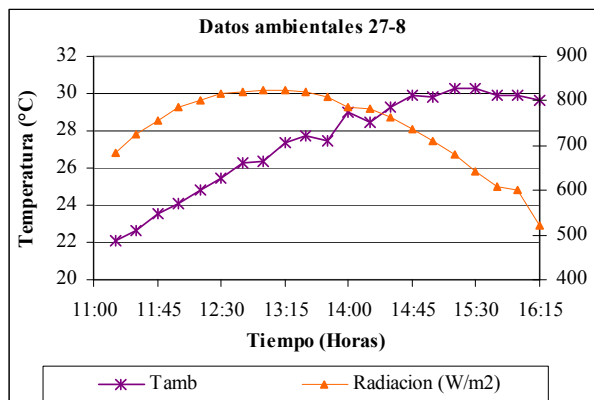


Figura 3: Distribución de temperatura y radiación, 27 de agosto

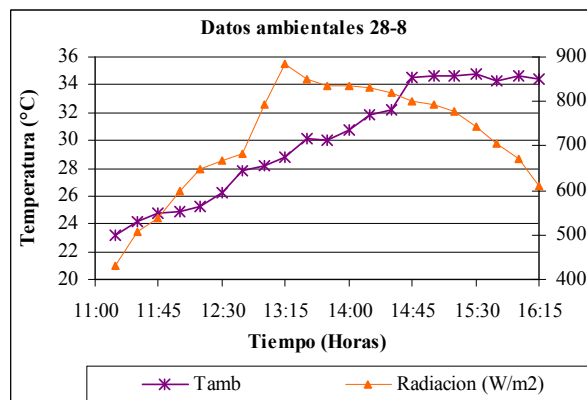


Figura 4: Distribución de temperatura y radiación, 28 de agosto

Las velocidades promedio de entrada para el colector en los días 27, 28 y 29 fueron 0.4 m/s, 0.27 m/s y 0.21 m/s, respectivamente. Las medidas de las velocidades se realizaron promediando los valores de distintos puntos a la entrada del colector.

En el último día de ensayo se presenta un comportamiento diferente a los días anteriores. Si bien se presenta una mayor radiación, el viento frío y la aparición de nubes al mediodía afectaron el funcionamiento del colector disminuyendo las temperaturas. Ese día también se trabajó con la menor velocidad del flujo, de forma que el flujo tiene un mayor tiempo de contacto con el absorbedor.

Las figuras 9, 10 y 11 muestran los valores de temperatura del flujo de aire para la columna central del colector en los días del ensayo. En la misma se observa que el sector inferior del colector alcanza temperaturas mayores que el sector superior, con una diferencia máxima de 15 °C entre ellas. Si el salto se refiere a la temperatura ambiente la diferencia es mayor a 25 °C en todos los casos. Al comparar estos resultados con las curvas de nivel de temperatura representadas en la figura 11, se observa que en la región central inferior (Termocuplas 3), se alcanzan las mayores temperaturas en los tres días del ensayo. Una causa posible puede ser originada por una deficiente distribución del flujo circulante en el ancho del colector. Ya que el colector trabaja en depresión, la manga de plástico tiende a deformarse en el centro, lo cual ocasiona que el flujo sea menor en la zona central que en las partes laterales.

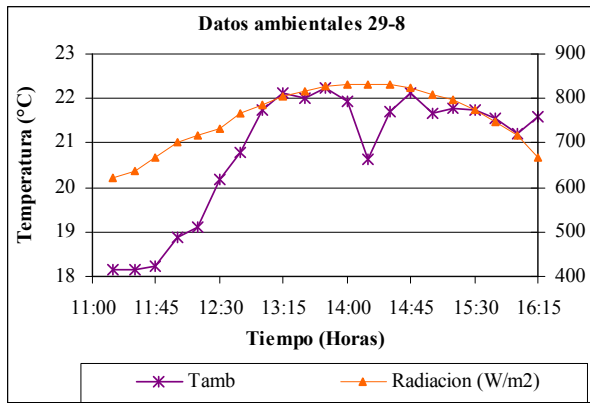


Figura 5: Distribución de temperatura y radiación, 29 de agosto

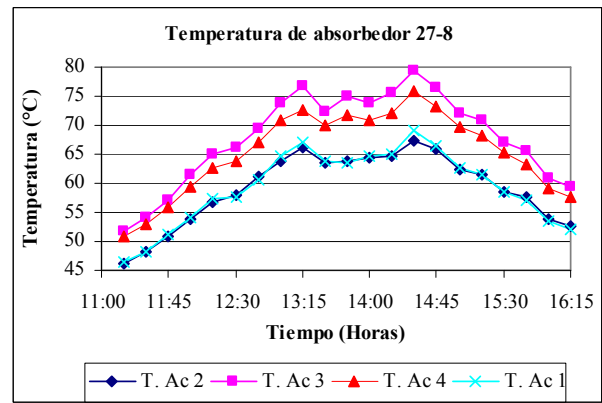


Figura 6: Distribución de temperatura, absorbedor 27 de agosto

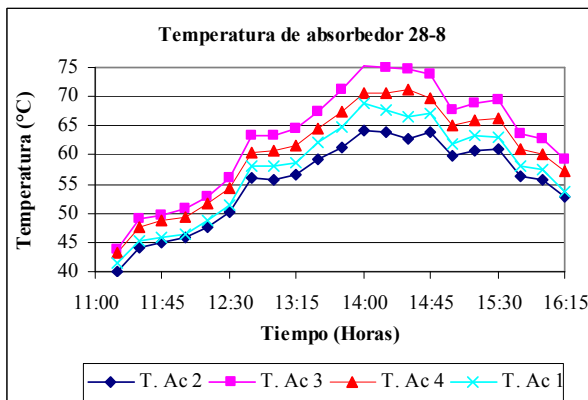


Figura 7: Distribución de temperatura, absorbedor 28/08

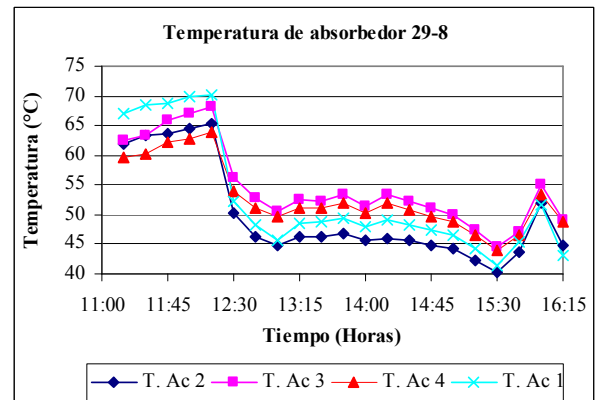


Figura 8: Distribución de temperatura, absorbedor 29/08

De las figuras también se observa que las termocuplas ubicadas sobre la región central superior (fila 2) miden temperaturas levemente menores que las termocuplas superiores (fila 1). Una causa posible de este comportamiento puede deberse a que el flujo en el sector superior presente más vórtices y que el flujo se encuentre en mayor contacto con el absorbedor causando un mayor intercambio de energía térmica.

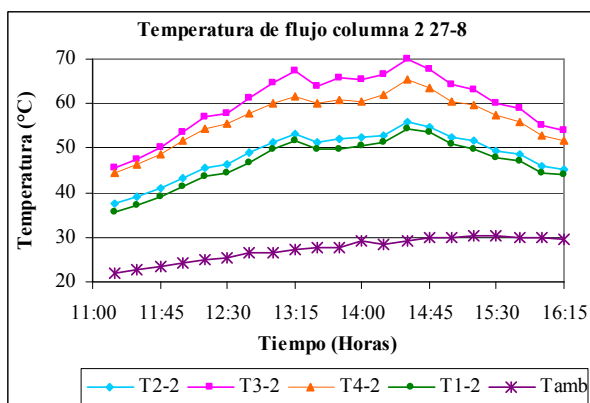


Figura 9: Temperaturas columna central del colector 27/08

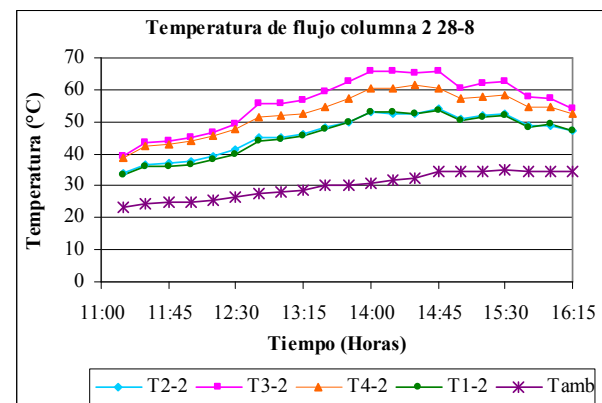


Figura 10: Temperaturas columna central del colector 28/08

En la figura 12 se representan los valores promedios de las temperaturas del aire a la salida del colector en los días ensayados, incluyendo también a la temperatura ambiente para los tres días. Se puede observar que la diferencia entre los valores medios a la salida y la temperatura ambiente para los días 27 y 28 supera los 25 °C y que el día 29, alcanza aproximadamente 18 °C, tomando como referencia el medio día solar.

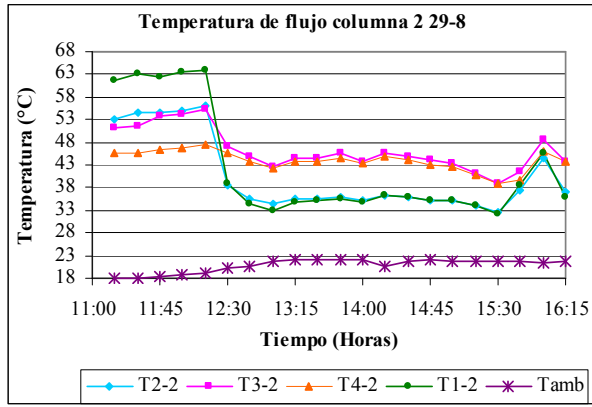


Figura 11: Temperaturas columna central del colector 29/08

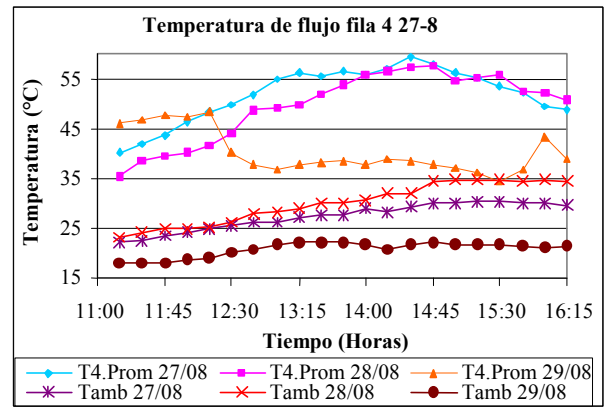


Figura 12: Temperaturas promedios de salida y temperatura ambiente

La figura 13, a, b y c representan las curvas de nivel de temperatura del flujo de aire dentro del colector, isotermas, para el mediodía solar (13:15 Hs) en los días 27, 28 y 29 de agosto, respectivamente. En todos los casos se puede observar máximos de temperatura en la región central y hacia la salida del colector. Este comportamiento se debe indudablemente a las pérdidas térmicas por los bordes que no permiten homogeneizar horizontalmente la distribución de temperatura dentro del mismo. Dado que el primer y segundo día son comparables en cuanto a las condiciones meteorológicas, se observa que para el primero existe una mayor formación de vórtices coincidente con el mayor flujo de aire. Si bien en el segundo y tercer día se observa una mejor distribución de temperatura, es claro que con la disminución del flujo de aire también se producen mayores pérdidas térmicas evidenciadas en las menores temperaturas que se obtienen.

De las gráficas de temperatura de aire anteriormente presentadas, se aprecia que en la parte inferior del colector existen temperaturas mas elevadas que en la parte superior. Esto está de acuerdo con la dirección del flujo de aire, de arriba hacia abajo, ya que en su trayectoria tiene mayor contacto con el absorbedor, alcanzando una mayor temperatura.

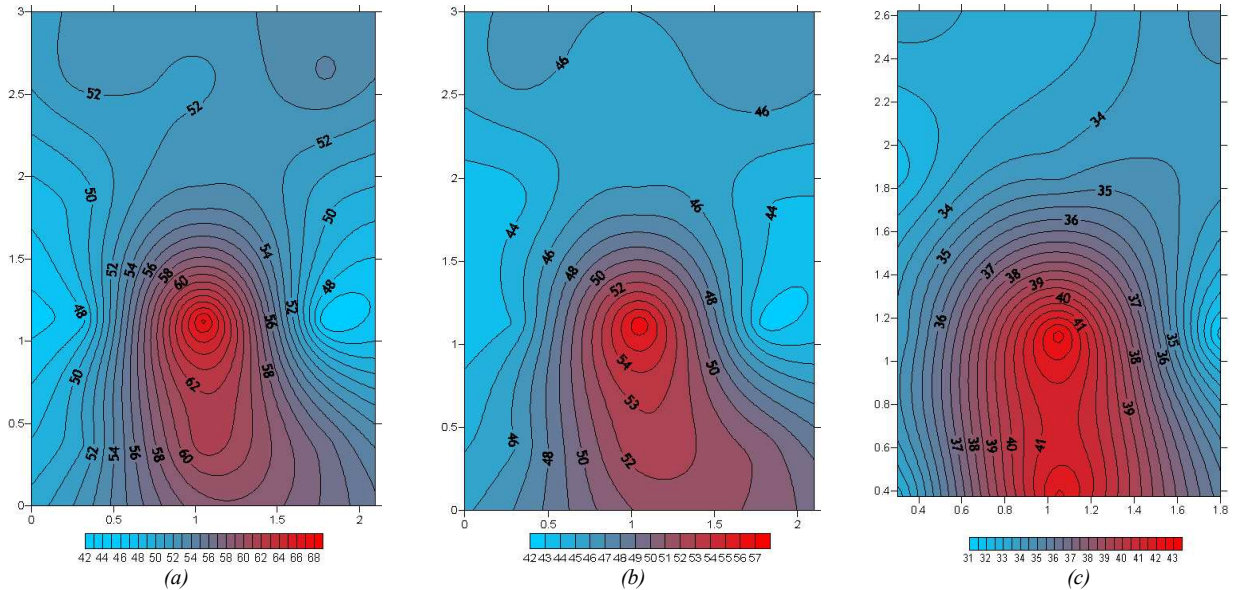


Figura 13: Isotermas (a) 27/08, (b) 28/08 y (c) 29/08

Todas las gráficas de temperatura en función del tiempo para los distintos días y sectores muestran un patrón comportamiento semejante, que también se observa en las gráficas de isotermas. Esto sugiere que a distintas condiciones ambientales y velocidades de flujo, el colector se comporta de manera similar en todos sus sectores.

La ecuación (1) corresponde a la expresión utilizada para evaluar la eficiencia térmica instantánea del colector:

$$\eta = \frac{\rho v A_{ent} C_p \Delta T}{A_{col} I} \quad (1)$$



donde  $V$  es la velocidad del aire. Se considera la velocidad del aire media a la entrada del colector, promediada sobre la base de medidas en distintos sectores de la boca de entrada. La diferencia de temperaturas  $\Delta T$  fue calculada entre la temperatura media de flujo a la salida del colector y la temperatura ambiente. Los valores de densidad y capacidad calorífica del aire fueron tabulados para un valor de temperatura de 320 K.  $I$  es la radiación total calculada para el plano del colector.

La gráfica de eficiencia instantánea se muestra en la figura 14. El mejor comportamiento del colector se presentó el día 27 de agosto, una eficiencia instantánea al medio día del 60 %, con velocidad de flujo de  $0,4 \text{ ms}^{-1}$ . El día 29 el cambio de clima, viento zonda, afectó el funcionamiento del colector, aun así la eficiencia supera el 40 %. Si bien la temperatura ambiente alcanzada para el día 28 de agosto fue la mayor para los tres días la radiación, se evidencia que la velocidad empleada para el colector no fue la óptima para alcanzar una mayor eficiencia. El encontrar una correlación para el flujo óptimo dependerá de la realización de más ensayos y con distintas velocidades del ventilador.

Las fotografías realizadas con el interferómetro fueron tomadas al mediodía solar, figura 15 y 16. En la primera de ellas se observa que el flujo en la boca de extracción de aire tiene una temperatura aproximada de  $49^\circ\text{C}$ . La segunda fotografía, figura 14, fue tomada en la parte posterior media del colector. Estas imágenes térmicas nos dan una idea del global de la distribución de temperatura en el absorbedor del colector. Se observa que la distribución de temperatura presenta una gran variedad de gradientes térmicos, dando una idea del comportamiento turbulento del flujo en el colector. Los sectores blancos indican regiones con temperaturas superiores a los  $49^\circ\text{C}$ .

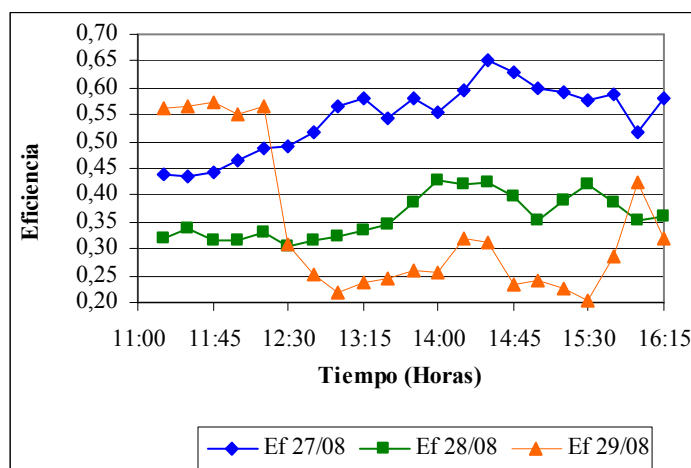


Figura 14: Eficiencia térmica instantánea del colector para los tres días de ensayo

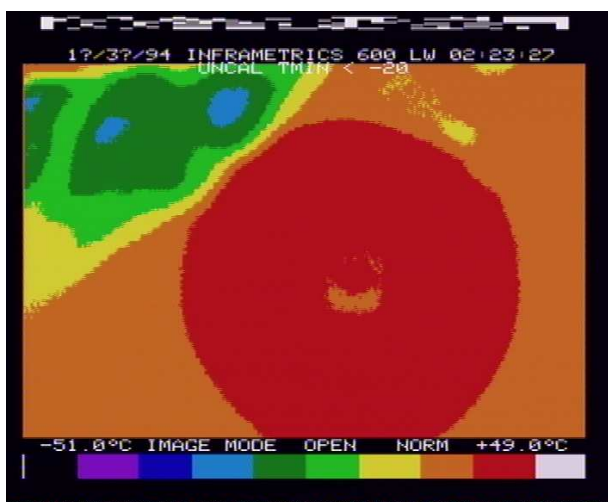


Figura 15: Imagen térmica del extractor de aire

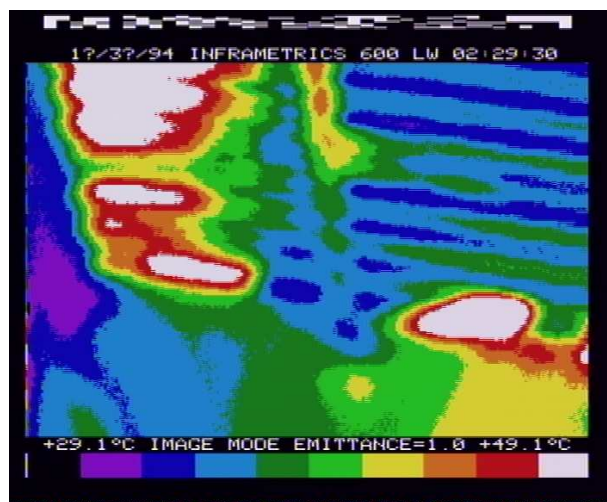


Figura 16: Imagen térmica de la parte posterior del acumulador.

## CONCLUSIONES

Los ensayos realizados muestra que del colector prototipo se pueden obtener eficiencia instantáneas del orden del 60 % con velocidad de aire de  $0,4 \text{ ms}^{-1}$ . Con flujos menores se obtuvieron menores rendimientos pero se requieren de mas ensayos para determinar el comportamiento con flujos mayores, a fin de determinar el punto de funcionamiento óptimo. Cabe esperar que el

valor obtenido de eficiencia sea conservativo ya que el colector está pensado como un modulo de un sistema cerrado, con lo cual las condiciones reales de funcionamiento serán más favorables que las ensayadas, en cuanto a que las pérdidas no serán directamente al ambiente.

Con respecto a la distribución de temperaturas dentro del colector, si bien hay cierta estratificación alrededor de un valor máximo en el centro del colector, no se observa uniformidad por niveles a lo largo de la dirección del flujo, debido a las pérdidas por los bordes y a la formación de turbulencias. En este sentido los resultados sugieren que la orientación transversal de la chapa respecto a la dirección del flujo favorece el intercambio de energía térmica, en acuerdo a los resultados de otros autores. El salto de temperatura respecto a la ambiente supera los 30 °C, si se considera la situación de mayor eficiencia instantánea. El rango de temperatura de salida que se obtiene del modulo, entre 40 °C y 60 °C, es apropiado para las aplicaciones de secado solar.

En trabajos futuros está previsto ensayar el colector con un mayor rango y un control mas preciso de flujo de aire, realizando un estudio de las perdidas de carga en el colector. Este estudio permitirá indagar que velocidad de flujo es la adecuada para una temperatura impuesta por el producto a tratar dentro del secador del cual el colector es envolvente. También, si bien el colector fue ensayado con una sola inclinación respecto del plano horizontal, están previstos ensayos estacionales con distintos ángulos de inclinación.

## RECONOCIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado con fondos del proyecto BID 1728/OC-AR PICTOS UNSa N°36646.

## REFERENCIAS

- [1] Ben Slama Romdhame. (2007). "The air solar collectors: Comparative study, introduction of baffles to favor the heat transfer". *Solar Energy* 81 (2007) 139–149
- [2] Plotter K., Sippel C.M., Beck A., and Fricke A (1999). "OPTIMIZED FINNED ABSORBER GEOMETRIES FOR SOLAR AIR HEATING COLLECTORS". *Solar Energy* Vol. 67, Nos. 1–3, pp. 35–52, 1999.
- [3] Metwally M. N., Abou-Ziyan H. Z., El-Leathy A.M. (1997). "Performance of advanced corrugated-duct solar air collector compared with five conventional designs". *Renewable Energy*, Vol 10, No 4, pp 519-537.
- [4] Campbell Scientific. Campbell Micrologger CR32X Overview. Revision 2/06
- [5] Campbell Scientific. AM25 Solid State Multiplexer Manual. Revision 2/06

## ABSTRACT:

In this paper, the study about the thermal behavior of a flat air solar collector is presented. This collector is designed as type modular one, for the industry and agricultural applications, as solar drying. The experimental prototype dimensions are 3,40 m, 2,10 m and 0,085 m, and it was tested in outdoor conditions. The experimental results obtained with active airflow are presented. The airflow temperatures obtained with the collector is appropriated for vegetables and fruit drying. The difference of temperature between the output collector and the environmental is around 20 °C, with an airflow velocity of 0,40 ms<sup>-1</sup>. In this last case, an instantaneous thermal efficiency around 50 % is obtained.

**Keywords:** air solar collector, industrial heating, energy save.